

LA INGENIERÍA COMPUTACIONAL EN LA ESCUELA DE CAMINOS DE BARCELONA

Antonio Huerta, Pedro Díez, Sonia Fernández-Méndez,
Agustí Pérez-Foguet, Antonio Rodríguez-Ferran y Josep Sarrate

Laboratori de Càlcul Numèric (LaCàN)
Departamento de Matemática Aplicada III
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

www-lacan.upc.es

Resumen

La ingeniería computacional se ha consolidado ya como una disciplina horizontal en el ámbito de la ingeniería civil. La modelización numérica es, cada vez más, una alternativa para el cálculo y diseño en ingeniería a los procedimientos simplificados típicamente recogidos por las normativas. Permite analizar fenómenos de mayor complejidad y obtener diseños más ajustados. En la Escuela de Caminos de Barcelona, estos aspectos se abordan en la intensificación en ingeniería computacional. Los métodos numéricos se presentan como herramientas para resolver problemas de ingeniería. Se abordan también aspectos tan o más importantes de la modelización numérica, como son la formulación del modelo matemático y el análisis crítico de los resultados numéricos.

1. Ingeniería computacional e ingeniería civil

Cada día se hace más patente que, en el ámbito de la ingeniería civil, hay dos enfoques para abordar el cálculo y diseño. Por un lado, las normativas proponen habitualmente métodos simplificados, basados en fórmulas analíticas. Se trata de fórmulas, a menudo de carácter empírico, muy útiles para el prediseño o incluso para el cálculo definitivo en situaciones convencionales, pero que pueden resultar demasiado conservadoras –a causa de las simplificaciones realizadas– en muchos casos, en especial cuando se trata de obras singulares.

Por otro lado, es cada vez más habitual recurrir a la modelización numérica para abordar problemas de difícil o imposible tratamiento según las normativas y/o para conseguir diseños más ajustados: análisis estructural no lineal (plasticidad, grandes deformaciones, pandeo postcrítico), leyes constitutivas complejas y construcción incremental en geotecnia, aerodinámica y acústica en transportes, dispersión de contaminantes, etc. Gracias a la resolución numérica, pueden incorporarse en el modelo matemático efectos complejos (de tipo geométrico, material o cualquier otro) cuyo tratamiento analítico resultaría inviable.

De hecho, la ingeniería computacional se ha consolidado ya como una disciplina horizontal en el ámbito de la ingeniería civil, con conexiones con prácticamente todas las disciplinas tradicionales: estructuras y construcción; terreno; hidráulica e hidrología; ingeniería ambiental; ingeniería marítima; transportes; etc.

2. La intensificación de ingeniería computacional en la Escuela de Caminos de Barcelona

El Laboratori de Càlcul Numèric (LaCàN) està constituït per un grup de professors dedicats a la docència e investigació en mètodes numèrics en ciències aplicades e ingenieria. Impartim assignatures de modelització numèrica en les distintes titulacions de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona: Caminos, Obras Públicas e Ingeniería Geológica. Para centrar la discusió, nos referirem aquí a la titulació de Ingeniería de Caminos. Discutirem primer breument les assignatures obligatòries de modelització numèrica, para referirnos luego, en més detall, a la intensificació de ingeniería computacional.

El objetivo de las *asignaturas obligatorias* es proporcionar las herramientas numéricas básicas para cualquier ingeniero de caminos, independientemente de su posterior especialización profesional. En el temario de estas asignaturas se tratan temas tan básicos como el análisis de propagación de errores, la resolución de grandes sistemas lineales, el cálculo de autovalores, la aproximación funcional, la integración numérica, la integración de ecuaciones diferenciales ordinarias y la resolución de ecuaciones en derivadas parciales (Huerta *et al.* 2001; Hoffman 1992).

Procuramos huir del formato típico de las asignaturas de cálculo numérico, en las que se eligen algunos problemas matemáticos de interés y se abordan distintos métodos numéricos para resolverlos. Preferimos hacer un enfoque más global, tratando todos los aspectos relevantes de la *modelización numérica*: (1) el análisis del fenómeno físico (observación y comprensión, recopilación de información, etc.), (2) la formulación de hipótesis sobre el fenómeno físico (simplificaciones, modelos teóricos, analogías, etc.), (3) la formulación del modelo matemático, (4) la resolución del problema matemático mediante métodos numéricos y (5) el análisis crítico y la interpretación ingenieril de los resultados. Nótese que los métodos numéricos, fase (4), tienen un papel instrumental en todo el proceso de modelización.

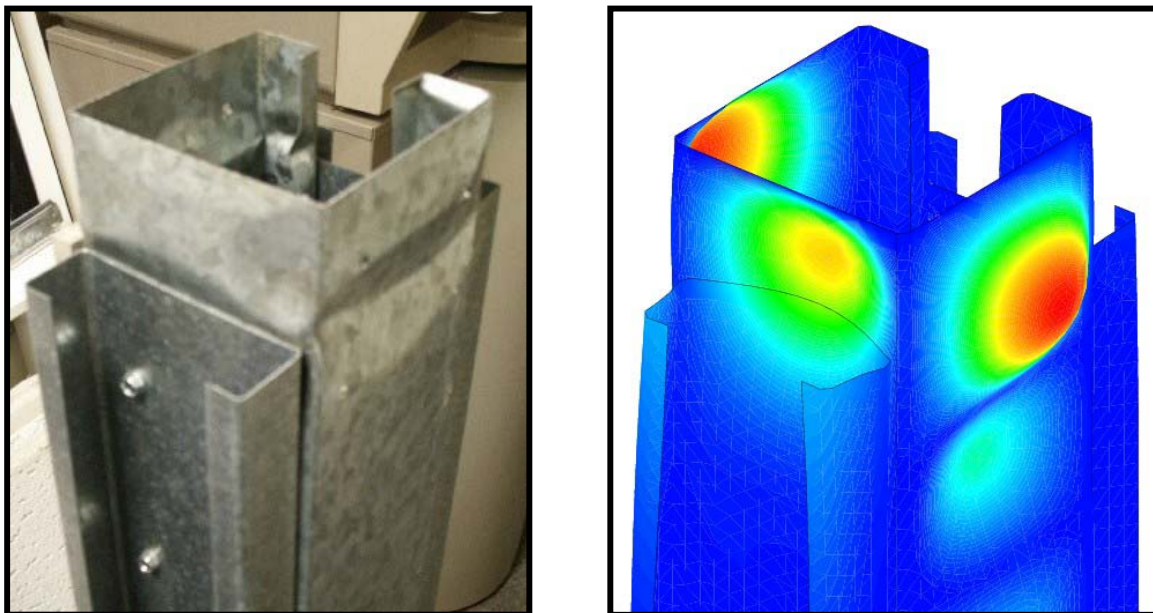


Figura 1. Pandeo local de un perfil metálico ligero. Ensayo de laboratorio (izda.) y simulación numérica (dcha.), obtenida mediante la resolución de un problema generalizado de autovalores.

Cada uno de los temas se introduce con el correspondiente ejemplo ingenieril. Así, el pandeo local de un perfil metálico conformado en frío sirve para motivar el llamado problema generalizado de autovalores (figura 1). Este ejemplo resulta muy ilustrativo de las diferencias entre el cálculo (o análisis) numérico y la modelización numérica. En las asignaturas y los textos clásicos de cálculo numérico (Hoffman 1992; Kincaid y Cheney 1994), se trata exclusivamente el llamado problema estándar de autovalores. Sin embargo, para nuestros estudiantes es mucho más útil la versión generalizada, puesto que modeliza dos problemas de gran interés: el pandeo y el comportamiento dinámico.

Veamos un segundo ejemplo. Como motivación del tema de aproximación funcional, se plantea el problema de interpolar el perfil de la llanta de un tren de alta velocidad a partir de algunas medidas (figura 2). Se trata de un problema de gran interés en ingeniería ferroviaria: debe garantizarse que el desgaste de la rueda no compromete el correcto contacto rueda-rail, un factor crítico para la dinámica del vehículo. Este ejemplo permite discutir, de manera muy convincente para los estudiantes, las limitaciones de la interpolación polinómica pura y las ventajas de la interpolación seccional (splines).

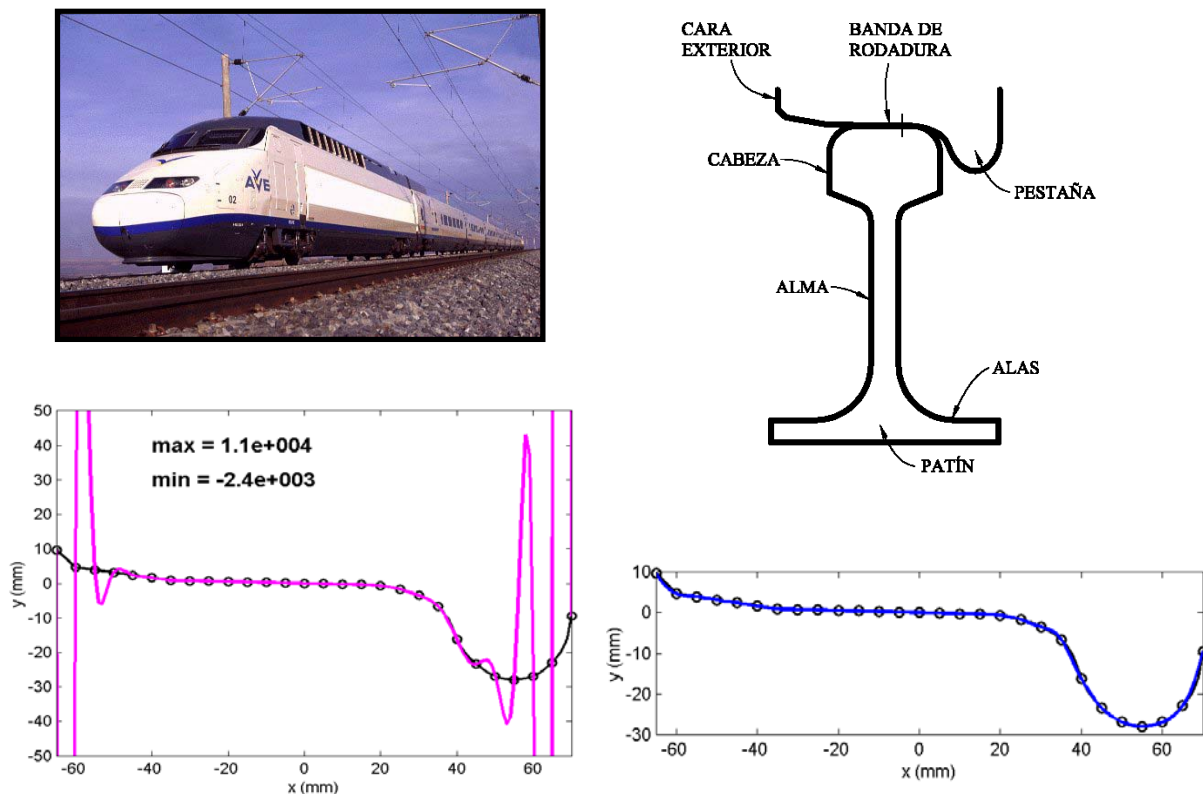


Figura 2. Interpolación del perfil de una llanta de un tren de alta velocidad. La interpolación polinómica pura provoca oscilaciones muy importantes (izda.), que pueden eliminarse recurriendo a la interpolación seccional mediante splines (dcha.)

Con este enfoque, el estudiante percibe los métodos numéricos como herramientas útiles para resolver problemas de ingeniería, y los asimila de manera mucho más natural que si se presentan de una forma más abstracta.

Una vez asimiladas las bases, el alumno interesado puede cursar la *intensificación en ingeniería computacional*, estructurada en cuatro asignaturas: Métodos Numéricos para EDPs, Métodos Numéricos Avanzados, Aplicaciones en Ingeniería Computacional y Análisis de Datos. El objetivo de las tres primeras asignaturas es completar la formación del estudiante en modelización numérica y profundizar en algunos temas, como el método de los elementos finitos, la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales, cada vez más frecuentes en las simulaciones en ingeniería, o la optimización.

El planteamiento es eminentemente práctico, trabajando en aula informática y empleando el método del caso. A partir de varios casos reales de distintas ramas de la ingeniería civil, se analizan las posibilidades y las limitaciones de los métodos numéricos. Se hace especial énfasis en aspectos como la modelización numérica del problema ingenieril, el análisis crítico de los resultados que proporciona el ordenador, el estudio de alternativas, etc., y se da menos importancia a las cuestiones de programación. El objetivo es que los estudiantes adquieran el criterio y los conocimientos necesarios para usar, según proceda y de forma complementaria, los métodos simplificados y los métodos numéricos propios de la ingeniería computacional.

3. El método del caso

En la intensificación en ingeniería computacional utilizamos el conocido método del caso. De esta forma, los métodos numéricos y los programas de ordenador quedan supeditados a la necesidad de resolver un determinado problema de ingeniería. A título ilustrativo, se presentan aquí brevemente cuatro de estos casos.

3.1 Diseño de una chimenea industrial (dispersión de contaminantes)

Como primer caso práctico, se considera el diseño de una chimenea industrial (figura 3). El parámetro fundamental de diseño es la altura necesaria de la chimenea para asegurar que el nivel de contaminantes a ras del suelo se mantiene por debajo de los límites permitidos. Se trata, por lo tanto, de estudiar la dispersión de los contaminantes emitidos por la central.

Para ello, se discute en primer lugar el llamado modelo gaussiano. Se trata de un modelo muy simplificado, de carácter ingenieril, que aborda el problema en dos fases: en primer lugar, se determina la trayectoria del penacho; en segundo lugar, se determina la concentración de contaminante a ras de suelo, bajo el penacho. Este enfoque desacoplado es posible gracias a las hipótesis simplificativas del modelo: (1) el penacho está completamente desarrollado (problema estacionario); (2) el campo de velocidades es unidimensional, constante y uniforme; (3) la difusión en la dirección del flujo es despreciable; (4) la fuente de emisión es puntual (boca de la chimenea); (5) no hay fenómenos de deposición ni de reacción química.

Estas hipótesis simplificativas son bastante restrictivas, y tiene como objetivo permitir la resolución analítica del problema. A efectos comparativos, se plantea como alternativa la modelización numérica de la dispersión de contaminantes como una ecuación en derivadas parciales de convección-difusión-reacción (Zlatev 1995), que permite tener en cuenta los distintos fenómenos físicos de interés (convección, difusión, emisión, deposición seca y húmeda, reacción química entre especies) así como el carácter transitorio y la complejidad geométrica del problema.

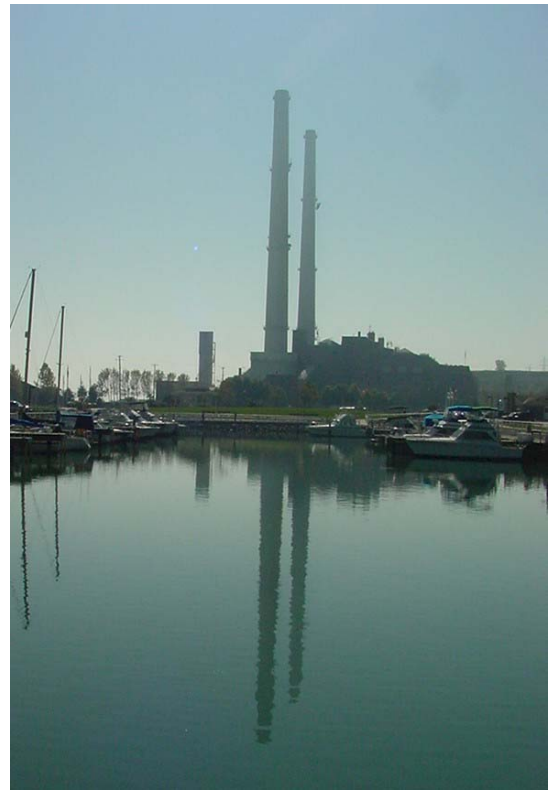
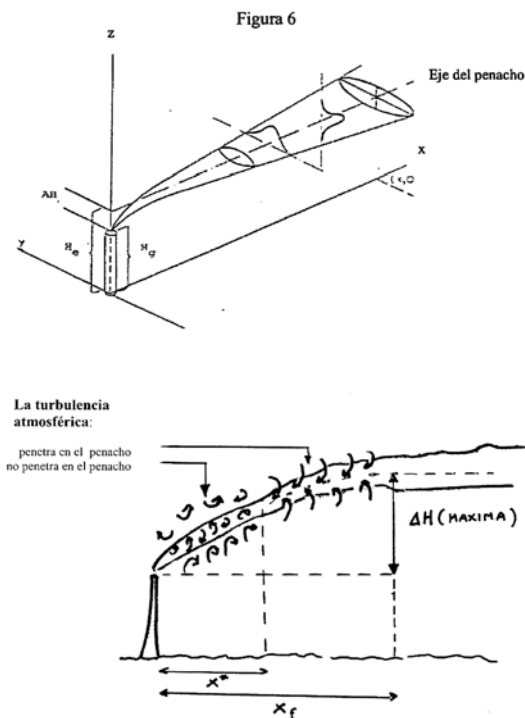


Figura 3. Diseño de una chimenea industrial. Con el modelo gaussiano, muy simplificado, se determina primero la trayectoria del penacho y luego la concentración de contaminantes.

3.2 La Ronda Litoral de Barcelona (flujo de agua en una excavación en trinchera)

Un problema típico en geotecnia es el dimensionamiento de las bombas de achique para una excavación en trinchera. Para ello, es necesario calcular el caudal de agua por la solera S tras realizar una excavación en el terreno, estudiando el fenómeno asociado de flujo en un medio poroso.

Empezamos el trabajo dirigido recordando a los estudiantes el modelo matemático: (1) la ley de Darcy, que relaciona el gradiente de la altura piezométrica h con el caudal unitario \mathbf{q} ,

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \nabla h$$

donde K_1 y K_2 son las permeabilidades horizontal y vertical (medio ortótropo), (2) la condición de incompresibilidad, $\nabla \cdot \mathbf{q} = 0$, y (3) la ecuación en derivadas parciales resultante de combinar ambas ecuaciones

$$\nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla h) = 0$$

y (4) las condiciones de contorno usuales de altura piezométrica prescrita y flujo prescrito, a menudo nulo correspondiendo a un contorno impermeable.

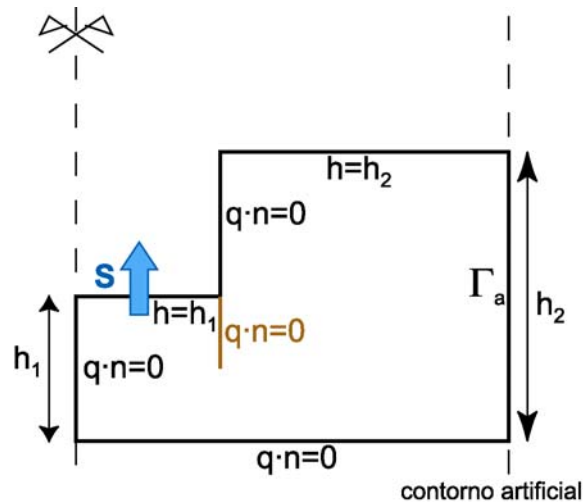


Figura 4. Excavación en la Ronda Litoral de Barcelona. Geometría y condiciones de contorno

A continuación se discute la geometría del problema, véase la figura 4. Se trata de la excavación en trinchera para un tramo de la Ronda Litoral de Barcelona parcialmente soterrado. Se ha tenido en cuenta la simetría del problema y se ha considerado un contorno artificial Γ_a (suficientemente lejos de la región de interés) para acotar el dominio de resolución. En el modelo también se incluye la pantalla (en marrón) que dificulta el paso del agua. De hecho, la profundidad de hincia de la pantalla es uno de los parámetros de diseño a analizar.

Para obtener la distribución de altura piezométrica, el campo de caudales unitarios y, a partir de aquí, el caudal en la solera (figura 5), los estudiantes utilizan el código de elementos finitos orientado al objeto Castem, inicialmente creado por el Commissariat a l'Energie Atomique francés y en cuyo desarrollo participa el Laboratori de Càlcul Numèric.

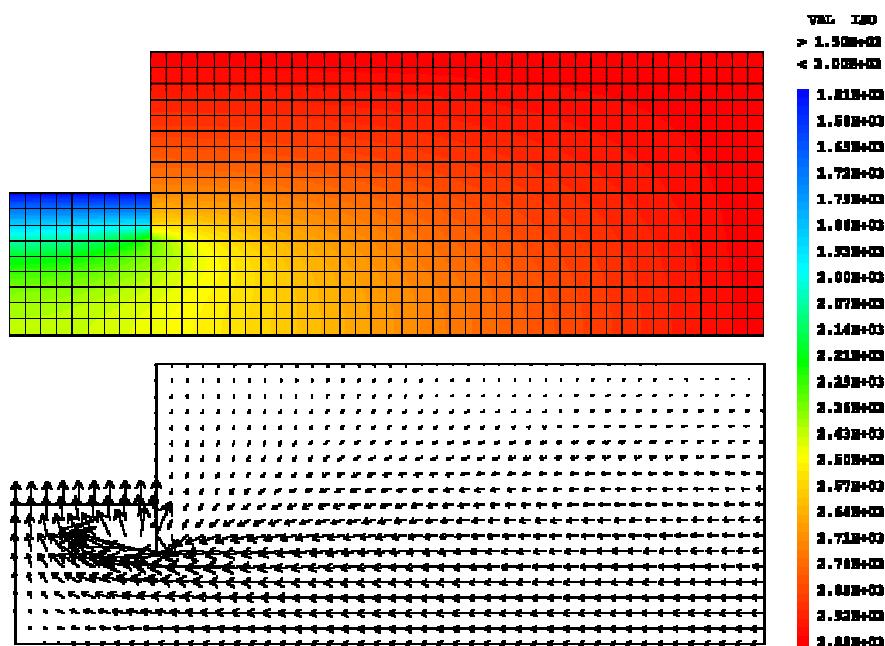


Figura 5. Ronda Litoral de Barcelona. Distribución de altura piezométrica y caudal unitario.

Con ayuda del modelo de elementos finitos, los estudiantes analizan los distintos factores numéricos y físicos de interés del problema: la influencia de la condición de contorno impuesta en el contorno ficticio Γ_a , cuándo se puede considerar que este contorno está suficientemente lejos de la excavación, cómo afecta la discretización del dominio en la solución, cómo afecta el hecho de que el medio sea ortótropo o isótropo, o cómo afecta la profundidad de hinca de la pantalla en el caudal de agua que sale por la solera, y, por lo tanto, en el equipo de bombeo necesario.

Este trabajo práctico permite que el alumno se familiarice con la resolución numérica y las características de problemas elípticos como la ecuación de flujo en medio poroso, la ecuación del calor o la ecuación de consolidación. Se recuerdan las condiciones de contorno típicas en este tipo de problemas y su significado físico, y se introduce el concepto de contorno ficticio y su tratamiento. Además, permite introducir un concepto muy importante: la fiabilidad en los resultados. Se proporciona al alumno herramientas muy intuitivas para decidir si la solución numérica obtenida cumple los requisitos necesarios de precisión y fiabilidad o, si por el contrario, es necesario realizar un proceso de refinamiento de la discretización.

3.3 Puente “Onze de setembre” (análisis estructural)

El siguiente caso consiste en analizar el comportamiento dinámico del puente “Onze de setembre”, un puente urbano que pasa por encima de la playa de vías en la estación de RENFE de la Sagrera (figura 6).



Figura 6. Puente “Onze de Setembre” durante la construcción

Se trata de un puente mixto con vigas en doble T de acero y tablero de hormigón. El hecho de que se trate de un puente real, y ya construido, motiva especialmente la atención y el interés del alumno.

Este caso se aborda en distintas asignaturas de la intensificación, haciendo énfasis en distintos aspectos. Así, por ejemplo, en la asignatura de elementos finitos se aborda en detalle el análisis dinámico lineal, bien mediante descomposición modal (figura 7), bien mediante esquemas de integración temporal.

En Métodos Numéricos Avanzados se estudia en detalle la respuesta en Estado Límite Último, incluyendo efectos de plastificación en las vigas de acero. Finalmente, en Aplicaciones en Ingeniería Computacional se hace un análisis menos detallado pero más global, discutiendo los distintos aspectos de interés: influencia de los rigidizadores transversales y de las condiciones de apoyo en los estribos en los modos y las frecuencias propias de vibración; reserva de resistencia asociada a fenómenos plásticos; diferencia de complejidad entre un cálculo lineal y uno no lineal; elevado coste computacional de los cálculos 3D, etc.

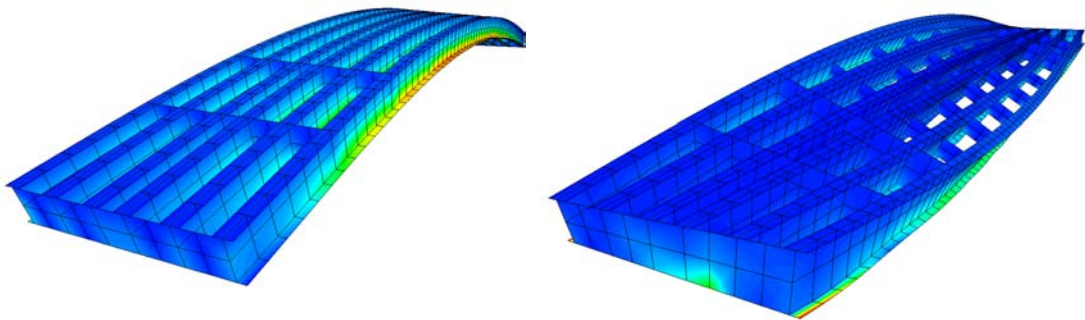


Figura 7. Primer modo, de flexión, (izda.) y segundo modo, de torsión, (dcha.) de vibración del puente “Onze de setembre”. No se muestra el tablero de hormigón, incluido en el cálculo.

3.4 Caverna de Estany Gento (excavación incremental)

En este tercer caso se modeliza numéricamente la excavación de la caverna de la central hidroeléctrica de Estany Gento (figura 8). De nuevo, el hecho de trabajar con un caso real nos ayuda a motivar a los estudiantes.

El trabajo práctico se articula alrededor de la siguiente pregunta: ¿hasta qué punto es necesario tener en cuenta el proceso incremental de excavación en el modelo numérico? Para ello se comparan entre sí los resultados de dos simulaciones: (1) suponiendo que la caverna se excava “de golpe”, en una sola fase, y (2) suponiendo una excavación en siete fases, capa a capa, más fiel a la realidad (Ledesma 1987).

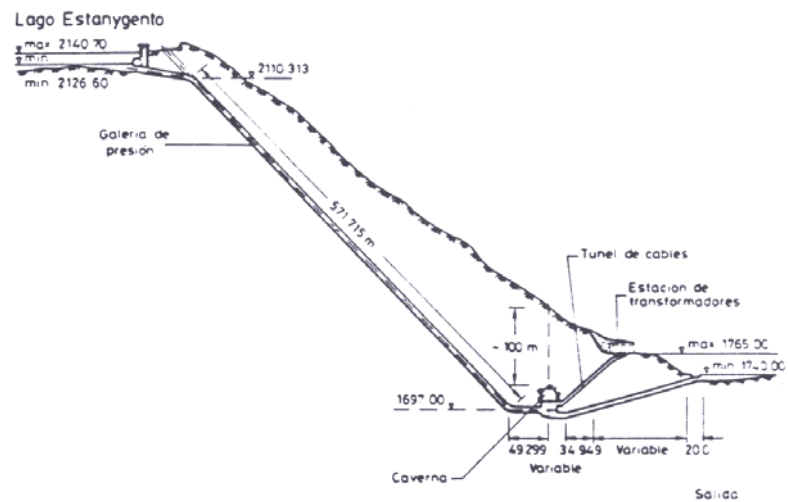


Fig. 21.-Sección del proyecto Estanygento-Sallente (según Wittke y Soria (1983)).

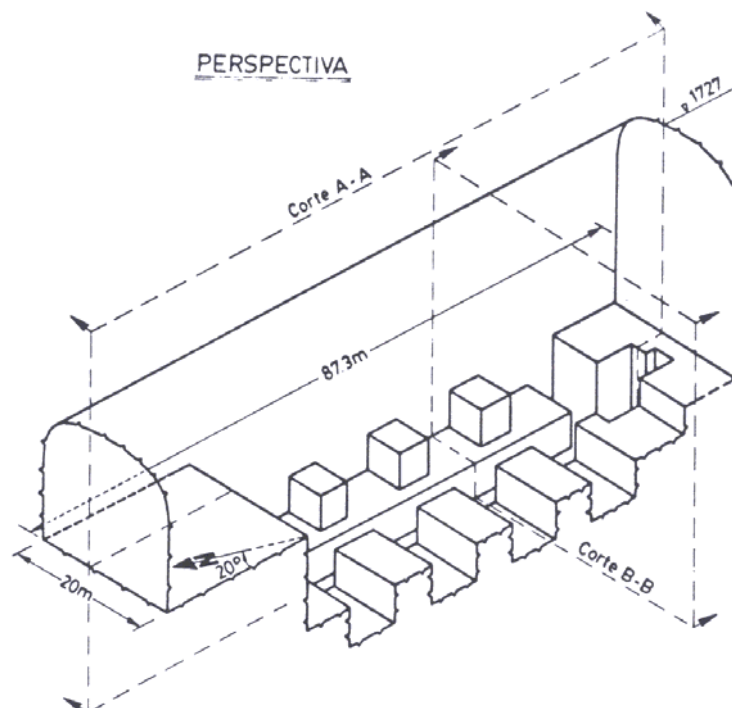


Fig. 22.- Perspectiva de la caverna (según Soria y Wittke (1984)).

Figura 8. Caverna de Estany Gento (Gens et al. 1989)

Empezamos con la construcción en una única fase. En la figura 9 se muestra la malla de elementos finitos de la sección a excavar y del terreno circundante, las fuerzas asociadas al material excavado y la deformada de las paredes de la caverna. Este último resultado es el de mayor interés ingenieril, ya que, por comparación entre las medidas de convergencia obtenidas in situ mediante extensómetros y los valores predichos por el modelo numérico, puede ajustarse los parámetros mecánicos del macizo rocoso (problema inverso). En la figura 10 se muestran las tensiones finales.

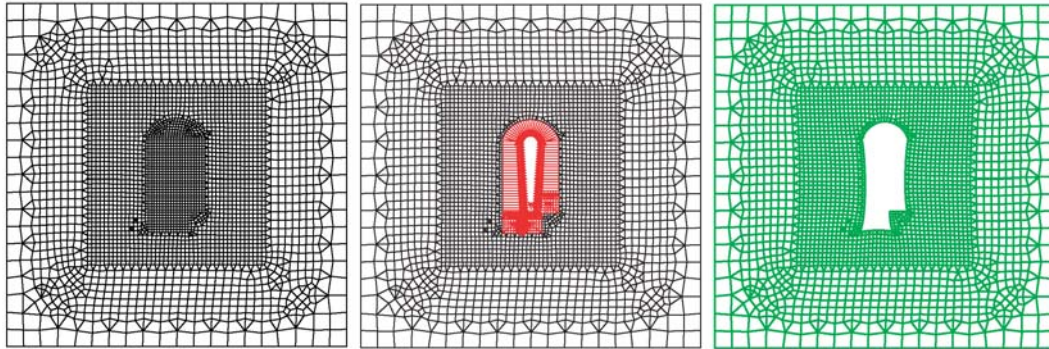


Figura 9. Discretización del terreno, fuerzas de superficie y deformada amplificada tras la excavación, cálculo con una única fase

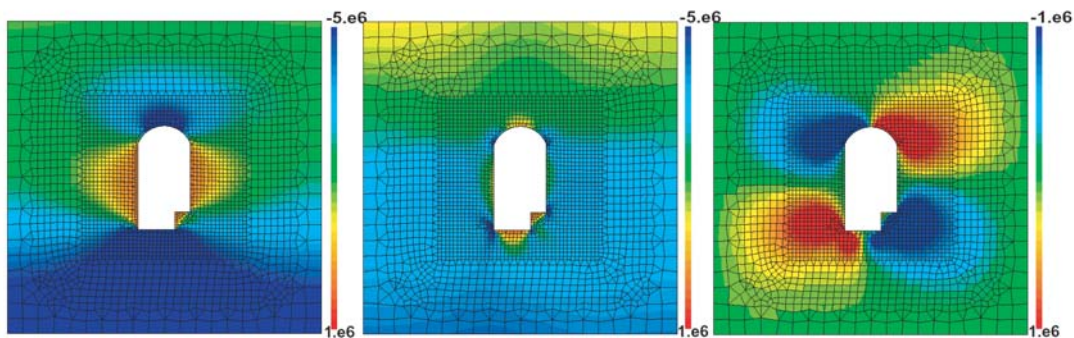


Figura 10. Componentes del tensor de tensiones σ_x , σ_y y τ_{xy} tras el cálculo con una única fase

A continuación analizamos la excavación capa a capa, en un total de siete fases. En las figuras 11 y 12 se muestran las fuerzas y la deformada asociadas a la excavación de la primera capa y de la última capa respectivamente. El estado final de tensiones, después de la excavación de la séptima capa, se refleja en la figura 13.

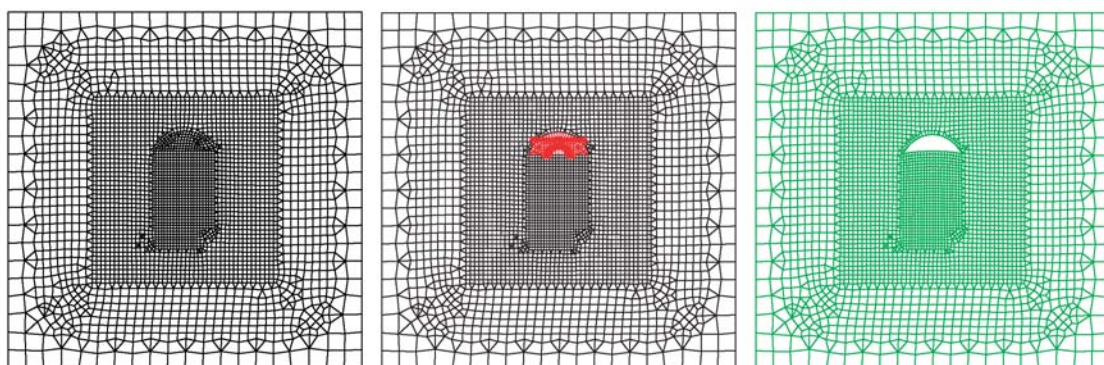


Figura 11. Malla de cálculo, fuerzas de superficie y deformada de la primera fase

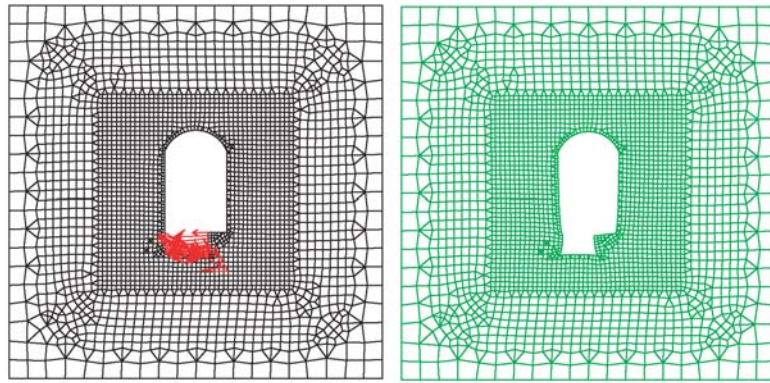


Figura 12. Fuerzas de superficie y deformada en la séptima y última fase

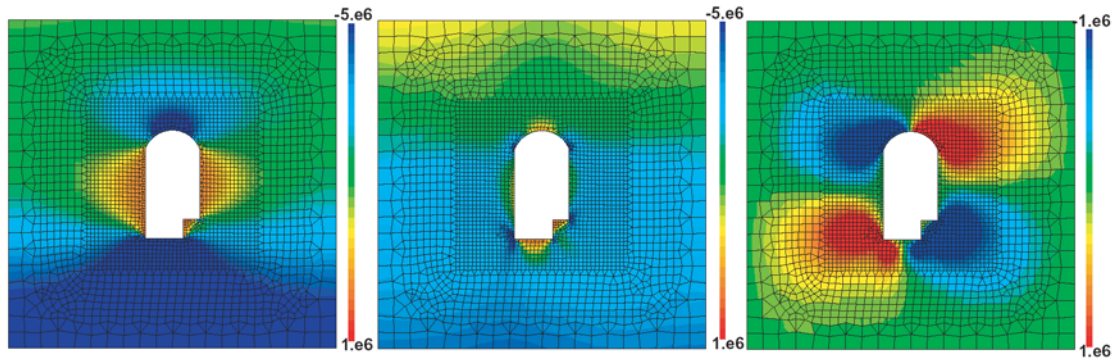


Figura 13. Componentes del tensor de tensiones σ_x , σ_y y τ_{xy} tras el cálculo con 7 fases

El hecho de que las distribuciones de tensiones sean muy similares para ambos análisis, figuras 10 y 13, parece sugerir que el proceso incremental no es un factor relevante en el modelo numérico. Esta conclusión demasiado apresurada cambia, sin embargo, al comparar los desplazamientos laterales (convergencia) de las paredes de la caverna, véase la figura 14: hay una diferencia apreciable entre excavar de golpe y excavar capa a capa, incluso para la misma situación final (es decir, una vez excavada la séptima capa). Este ejemplo ilustra la importancia de tener en cuenta los factores más relevantes del problema ingenieril en la formulación del modelo numérico.

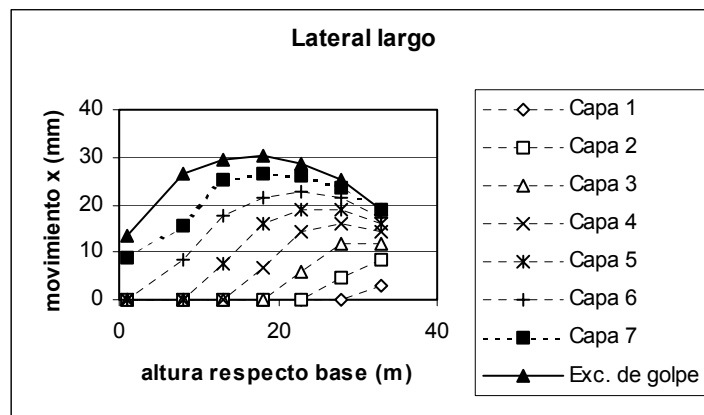


Figura 14. Desplazamiento lateral (convergencia) de la pared de la caverna de Estany Gento.

4. Conclusiones

Con estos y otros casos prácticos, intentamos dar a nuestros estudiantes una visión general de las posibilidades –y, también, las limitaciones– de la ingeniería computacional en el ámbito de la ingeniería civil.

Insistimos para ello en el carácter instrumental que, para los ingenieros, tienen los métodos numéricos. De hecho, la resolución numérica del modelo matemático es únicamente la fase central de la modelización numérica. Debe ir precedida de una cuidadosa formulación del modelo matemático, y debe ir seguida de un análisis crítico, desde una perspectiva ingenieril, de los resultados.

Pretendemos que adquieran el criterio suficiente para elegir en cada momento la herramienta de cálculo y diseño más adecuada. Tan desafortunado puede resultar recurrir a un sofisticado programa de cálculo por elementos finitos para realizar un primer predimensionamiento como pretender trabajar exclusivamente con métodos simplificados de cálculo basados en fórmulas analíticas durante todo el proyecto.

Estamos convencidos de que este doble enfoque será cada vez importante, y de que la ingeniería computacional será imprescindible para los ingenieros civiles del futuro.

Referencias

Gens, A.; Ledesma A.; Alonso, E. “Identificación de parámetros en geomecánica”, capítulo 1 de *Sistemas en la ingeniería civil, Identificación, Optimización, Control*, editor J. Rodellar, CIMNE, 1989.

Hoffman, J.D. *Numerical methods for engineers and scientists*. McGraw-Hill, 1992.

Huerta, A.; Sarrate, J.; Rodríguez-Ferran, A. *Métodos numéricos. Introducción, aplicaciones y programación*. Aula Politècnica / ETSECCPB, Edicions UPC, 2001.

Kincaid, D.; Cheney, W. *Análisis numérico. Las matemáticas del cálculo científico*, Addison-Wesley Iberoamericana, 1994.

Ledesma, A. *Identificación óptima de parámetros en geotecnia. Aplicación a la excavación de túneles*. Tesis doctoral, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya, 1987.

Zlatev, Z. *Computer treatment of large air pollution models*. Kluwer, 1995.